

ГИДРОТЕХНИКА

Г. Г. ХАЧИКЯН

О ПАРАМЕТРАХ ГЛУБИННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ
В ВЫСОКОНАПОРНЫХ ТУННЕЛЯХ

Глубинная цементация в гидротехнических туннелях с одной стороны консолидирует и закрепляет трещиноватые скальные породы вокруг выработки, с другой—значительно уменьшает утечку воды. Это мероприятие позволяет максимально использовать несущую способность скалы и, в ряде случаев, дорогостоящие металлические и железобетонные обделки высоконапорных туннелей заменить выравнивающими или тонкостенными бетонными покрытиями. Благодаря указанным достоинствам, такие туннельные конструкции все чаще находят применение в напорных туннелях, сооружаемых в нашей стране и за рубежом. Рост объемов буровых и нагнетательных работ компенсируется стоимостью металла и бетона, вместо которых как строительный материал используется цементно-песчаный раствор [1]. Цементный камень, образующийся в пустотах породы, повышает ее прочностные и деформационные характеристики, что позволяет зацементированному слою воспринимать большую часть внутренней гидростатической нагрузки. Туннель Розелан-Бати во Франции при напоре 16,3 атм имеет бетонную облицовку толщиной всего 0,2—0,3 м и железобетонную обделку толщиной 0,3 м с глубокой цементацией окружающей породы. Нагнетание раствора выполнено при давлении 80 атм через 12 скважины (глубиной 3 м) по периметру сечения туннеля, расположенных через 2,5 м по длине туннеля. Туннель Ингури ГЭС в Грузии (диаметром 9,5 м и напором 16,5 атм) проходит в слоистых трещиноватых известняках. Обделка осуществлена в виде тонкого выравнивающего бетонного кольца толщиной 0,5 м с глубокой цементацией горных пород через радиальные скважины под давлением 20—30 атм.

Многочисленные экспериментальные данные [2, 3], полученные в натурных условиях, показывают, что благодаря омоноличиванию и обжатия породы при цементации под высоким давлением ее прочностные и деформационные характеристики повышаются примерно в 1,5—2,5 раза. Примером могут служить данные исследований деформативных свойств горных пород, залегающих в основании плотины Пьяна в Италии, где цементация трещиноватых скальных пород повысила их коэффициент отпора в 1,5 раза. Исследования были проведены в опытной штольне при равномерном внутреннем давлении

15 кГ/см² [2]. В отдельных случаях упругие характеристики скальной породы после цементации не уступают показателям бетона, а порода становится почти водонепроницаемой [3].

По статическим условиям работы укрепленный слой массива можно представить как толстостенную трубу (рис. 1), испытывающую внутреннее равномерное давление воды [4]. Рассматривая этот зацементированный слой скалы вместе с окружающей бесконечной средой как составную трубу, на основе формулы Ламе получим уравнение радиальных перемещений на контакте двух зон при отсутствии продольных смещений системы [5]:

$$\frac{(1-\nu_0) a_0}{E_0 (a_0^2 - a^2)} \left[(1-2\nu_0)(a^2 p - a_0^2 z_0) + (P - z_0)a^2 \right] = (1+\nu_0) \frac{a_0 z_0}{E_0}, \quad (1)$$

где p — гидростатическое давление в туннеле;

a_0 и a — соответственно радиусы цементации и туннеля;
 E_0 и ν_0 — модуль упругости и коэффициент поперечной деформации закрепленной породы в массиве;

E_0 и ν_0 — модуль упругости и коэффициент поперечной деформации породы в ее естественном состоянии;

z_0 — доля внутренней нагрузки, воспринимаемой неукрепленной породой (упругий отпор породы).

Из выражения (1) получим величину радиуса укрепительной цементации

$$a_0 = a \sqrt{\frac{m + P/z_0}{m + 1}}, \quad (2)$$

где $m = \frac{(1+\nu_0)E_0 - (1+\nu_0)E_0}{2(1-\nu_0^2)E_0}$ — фактор упругих характеристик.

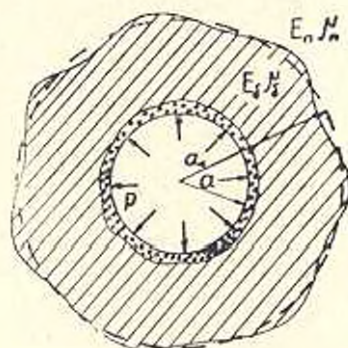


Рис. 1.

Методика определения упругих свойств горных пород в рассматриваемом случае приобретает весьма важное значение. Известно, что порода в условиях естественного залегания находится в начальном напряженном состоянии от веса вышележащей толщи. Однако, учет

этих сил при решении различных задач механики горных пород связан с довольно сложными вопросами. Это объясняется наличием многочисленных факторов, трудно поддающихся учету, изменением напряженного состояния во времени из-за упруго-пластических перемещений породы в сторону выработки, процессом ползучести и релаксации, образованием нарушенной зоны и т. д. К тому же, при наличии каверн и неоднородностей в массиве, действительная картина распределения этих напряжений может значительно отличаться от результатов расчета, полученных методами теории упругости изотропного тела. Исходя из этих соображений, в практике проектирования подземных напорных сооружений обычно эти силы не принимаются в расчет, имея в виду, что их влияние на деформируемость породы фактически учитывается при исследовании упругих характеристик породы в туннельных условиях. Наиболее достоверным способом исследования этих показателей является испытание готовых туннелей или параллельных им опытных цилиндрических камер, которое, несмотря на высокую стоимость, нашло довольно широкое применение в практике строительства плотин и туннелей [6]. Основное преимущество этого метода заключается в определенном уменьшении влияния масштабного фактора на результаты опытов и в учете естественного напряженного состояния, существующего в массиве горных пород.

Контактное давление на наружной поверхности зацементированного слоя вызывает растягивающие напряжения в области неукрепленных горных пород. Для обеспечения надежной работы несущей конструкции совместно с окружающей средой необходимо, чтобы эти растягивающие усилия находились в допустимых пределах. Подставляя в (2) величину допускаемого напряжения на растяжение σ_n для горных пород, находящихся в естественном состоянии, получим необходимый радиус цементации.

Из этого выражения находим глубину укрепительной цементации

$$a - a_0 = a - a \left(\sqrt{\frac{m + P_0 \varepsilon_n}{m + 1}} - 1 \right). \quad (3)$$

Цементационное давление P_0 должно компенсировать растягивающие напряжения от напора воды, появляющиеся на радиальных сечениях зацементированного слоя. Максимальные растягивающие напряжения на внутренней поверхности туннеля определяются из формулы толстостенной трубы [5]:

$$\sigma_0 = \frac{(a_0^2 + a^2)P - 2a_0^2 \varepsilon_n}{a_0^2 - a^2}. \quad (4)$$

Приравнявая P_0 и σ_0 и имея в виду зависимость (2), получится [7, 8]:

$$P_0 = P + 2m \varepsilon_n. \quad (5)$$

т. е. цементационное давление зависит от внутренней нагрузки в туннеле и от прочностных и деформационных характеристик породы.

Первоначальное давление цементного раствора не остается постоянным с течением времени. Оно может понижаться от усадки раствора, ползучести бетона и породы и от различных потерь. Применением растворов на расширяющемся или безусадочном цементе можно достигнуть уменьшения или даже полного исключения влияния усадки раствора на снижение первоначального (рабочего) давления.

Укрепительная цементация напорных туннелей, проходящих в трещиноватых горных породах, может найти применение также и в условиях Армянской ССР.

Предположим, что туннель с внутренним давлением 15 кг/см^2 залегает в породах, для которых предельное напряжение на растяжение равно 6 кг/см^2 . Если коэффициент запаса принять $n=2$, то $\sigma_{\text{п}} = 3 \text{ кг/см}^2$. Определим необходимые параметры глубинной цементации, считая, что, благодаря укреплению, модуль упругости скалы возрастает в 1,5 раза, т. е. $E_0/E_{\text{п}} = 1,5$. Принимая $\mu_0 = 0,17$ и $\mu_{\text{п}} = 0,2$, получаем: $m = 0,322$; $d \approx a$; $P_{\text{п}} = 17 \text{ кг/см}^2$. Эти параметры отвечают современной практике укрепительной цементации, применяемой в гидротехническом туннелестроении.

Применение предложенных формул для определения параметров глубинной цементации позволит улучшить проектирование и строительство высоконапорных туннелей в трещиноватых скальных породах за счет повышения их строительных качеств и несущей способности.

ЕрПН им. К. Маркса

Поступило 1.III.1971.

Ն. Գ. ԽԱՉԻԿՅԱՆ

ԲԱՐՁՐ ԸՆՇՈՒՐԱՅԻՆ ԹՈՒՆԵԼՆԵՐՈՒՄ ԽՈՐՀԱՆՈՒՄԻՆ ՑՈՒՐԵՆՏԱՑՈՒՄ ՊԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ ԻՍԽԱՆ

Ա. Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ճնշումային թունելներում ամրապնդող ջեմենտացումը կիրառվում է չեղրավոր մայրալին ապարների առաձգական և մեխանիկական բնութագրերը բարձրացնելու և ջրանցկությունը փոքրացնելու նպատակով: Մաճնարավորություն է ապին զգալիորեն բարձրացնել ջեմենտացված ապարների կրողունակությունը և նրանց հազորդել ներքին հիդրոստատիկ ճնշման մեծ մասը: Հոգվածում այդ ամրապնդված շերտը դիտվում է որպես հասապատերով զանաձն խողովակ, որի ներքին մակերևույթի վրա ազդում է ջրի ճնշումը, իսկ արտաքինի վրա՝ բնական փնակում գտնվող զանգվածի առաձգական հակազդումը: Ամրապնդվող ջեմենտացման հիմնական պարամետրերն են՝ ջեմենտա-ավազային շաղախի ներարկման խորությունը և նրա ճնշումը: Ցեմենտացման խորությունը (խողովակի արտաքին շաղախը) որոշվում է չամրապնդված ապարներում առաջացող ձգող լարումները թուլատրելի սահմաններում պահելու պայմանից: Ներարկման ճնշման մեծու-

թիւնը որոշվում է այն պայմանից, որ նա լինի մեծ կամ համաստի տնրա-
պնդված շերտում անաշտացած մաքրումում ձգող լարումներից: Առաջարկվող
մեթոդով ստացվող պարամետրները համապատասխանում են այն տվյալ-
ներին, որոնք հայտնի են հիդրոտեխնիկական թունելաշինության մասն-
նախկին պրակտիկայում:

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Эристон В. С. О конструкции и расчете обделок высоконапорных гидротехнических туннелей. «Гидротехническое строительство», № 11, 1963.
- 2 Звараев Г. Г., Бугаева О. Е. Гидротехнические туннели гидроэлектрических станций. Госэнергоиздат, 1962.
- 3 Лисас Э. Э. Об использовании цементации в конструкциях обделок высоконапорных гидротехнических туннелей. «Гидротехническое строительство», № 10, 1968.
- 4 Ачikian Г. Г. О глубине укрепительной цементации в напорных гидротехнических туннелях. «Гидротехническое строительство», № 12, 1964.
- 5 Тимошенко С. П. Курс сопротивления материалов. Госиздат, 1928.
- 6 Заирцев Г. П. Методы испытаний деформаций массивов породы под нагрузкой и опытных выработках. В со. «Проектирование и сооружение гидротехнических туннелей и подземных ГЭС», Госэнергоиздат, 1963.
- 7 Ачikian Г. Г. О величине давления укрепительной цементации в напорных туннелях. «Гидротехническое строительство», № 8, 1970.
- 8 Птарикян Л. А. Методы расчета эффективности укрепительной цементации напорных гидротехнических туннелей. «Тезисы докладов XXI научно-технической конференции ЕрПИ», Ереван, 1974.